УДК 535.361

ПЕРЕДАЧА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПОГЛОЩАЮЩИЕ СЛОИ, СОВМЕЩАЕМЫЕ С МИНИМУМОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

В.Ф. Мышкин, А.Н. Моторин

Томский политехнический университет
E-mail: gos100@list.ru

Описываются интерференционный метод и устройство формирования модулированного во времени потока лазерного излучения. Показано, что такой поток излучения при совпадении минимума интерференции с поглощающим слоем может проходить без заметного ослабления.

Введение

Оптические методы диагностики позволяют дистанционно определять параметры гетерогенных систем, имеющих широкое применение в плазменной и химической технологиях. При прохождении оптического излучения в гетерогенной среде наблюдаются рассеяние и поглощение. Поэтому перемещение точки подсвечивания оптическим излучением вглубь гетерогенной среды, при определении или контроле её параметров, может сопровождаться зна-

чительным уменьшением как суммарной яркости, так и контраста наблюдаемого изображения. Традиционным приемом для увеличения соотношения сигнал – шум является использование модулированного по мощности зондирующего излучения с синхронным детектированием на частоте модуляции рассеянного потока. Может использоваться как единичный фотоприемник, так и матричный.

Механический модулятор оптического излучения может быть выполнен в виде установленного на вращающемся валу непрозрачного диска с прорезями, ориентированными по радиусу. Интерферометрический модулятор мощности излучения содержит оптически прозрачную среду, в которой последовательно по ходу излучения сформированы разделитель потока оптического излучения и участок для когерентного суммирования этих потоков. Один из этих каналов распространения снабжен устройством изменения фазы оптического излучения относительно фазы потока в другом канале. В таком модуляторе происходит блокирование прохождению на выход потока оптического излучения, за счет когерентного взаимодействия на выходе интерферометра двух сдвинутых на полуволну пучков [1].

Зондирование модулированным по мощности излучением позволяет увеличивать контрастность изображения (или соотношение сигнал-шум для одиночного фотоприемника), но не влияет на регистрируемую яркость излучения.

Разработка способа модуляции лазерного излучения

С целью передачи максимальной части энергии зондирующего излучения в счетный объем минимального размера при диагностике параметров дисперсных частиц в оптически плотных аэрозолях нами была использована стоячая световая волна [2]. Для этого формировали два пучка коллимированных и поляризированных в одной плоскости оптических излучений, которые ориентировали навстречу вдоль одной прямой. Дополнительно эти два встречных пучка были сфокусированы в общей точке, совпадающей с узлом стоячей волны. При этом счетный объем локализован в области перетяжки в пределах нескольких пучностей стоячей волны оптического излучения.

При апробации способа использован гелий-неоновый лазер, выходное излучение которого коллимировали до диаметра 20 мм. Для фокусирования встречных пучков и сбора рассеянного потока использованы объективы "Гелиос-44". Собирающий объектив строил увеличенное в 5 раз изображение счетного объема на диафрагме диаметром 0,3 мм, за которой располагали фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) ФЭУ-114. Согласно нашим оценкам, за счет использования стоячих волн в области каустики объективов, максимальная концентрация дисперсных частиц в счетном объеме (при которой возможен анализ отдельных частиц) может значительно превышать предельное значение для известных счетчиков частиц.

Нами разработан интерферометрический метод модуляции мощности потока лазерного излучения, в котором когерентное взаимодействие потоков осуществляется на всем протяжении трассы. Изменение мощности излучения в каждой точке трассы происходит при биении частот, сдвинутых по частоте на малую величину когерентных потоков. Использован доплеровский метод перестройки спектрального состава лазерного излучения – изменение длины волны при отражении от подвижного зеркала. При этом каждая спектральная компонента исходного многомодового излучения смещается на точно контролируемую величину.

В качестве модулятора мощности лазерного излучения апробирован интерферометр на основе трёхзеркального резонатора. В интерферометре выходной пучок гелий-неонового лазера проходит через светоделительную пластинку. Отраженный от плоского выносного зеркала луч возвращается обратно в резонатор лазера. В резонаторе, кроме исходного излучения, усиливается излучение, отраженное от подвижного зеркала, между которыми возникают биения. Светоделительная пластинка позволяет сформировать выходной луч, модулированный по мощности.

В интерферометре использованы: гелий-неоновый лазер ЛГН-118-3В, ФЭУ-83. Выносное зеркало диаметром 18 мм совершало возвратно-поступательные движения с амплитудой 2,5 см за 4 с. Были установлены следующие расстояния: лазер – светоделительная пластинка 6 см, светоделительная пластинка – выносное зеркало 19,5...22,0 см. Временную зависимость мощности электрического сигнала ФЭУ регистрировали с помощью запоминающего осциллографа С8-13, осциллограммы которого фотографировали с помощью цифрового фотоаппарата.

Осциллограмма мощности потока модулированного излучения гелий-неонового лазера ЛГН-118-3В приведена на рис. 1. Развертка осциллографа – 20 мс/дел, чувствительность – 50 мВ/дел. Запуск развертки осциллографа производился в разные фазы поступательного движения зеркала. Это позволяло получать разные доплеровские частоты. На осциллограмме горизонтальная линия уровень нулевого напряжения. Постоянная составляющая в потоке модулированного оптического излучения обусловлена разными значениями интенсивностей излучений, интерферирующих в резонаторе лазера, а также широким спектральным составом многомодового излучения.

Установлено, что амплитуда переменного сигнала ФЭУ на доплеровской частоте испытывает хаотические колебания (рис. 1), обусловленные непостоянством генерируемой лазером мощности и различными внешними факторами. В сигнале ФЭУ при неподвижном выносном зеркале также регистрируются гармонические составляющие с частотой 0,5 МГц и более. При этом уровень модуляции постоянного сигнала высокочастотной сос-

тавляющей не превышает 2 %. Характер временной зависимости амплитуды высокочастотной составляющей сигнала ФЭУ остается неизменным при различных внешних условиях.

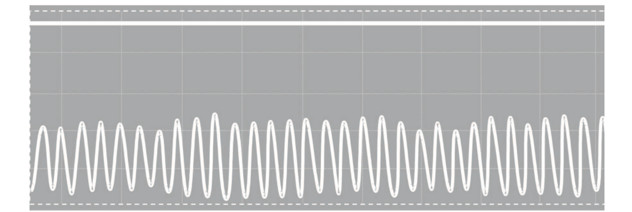


Рис. 1. *Осциллограмма модулированного луча лазера ЛГН-118-3В*

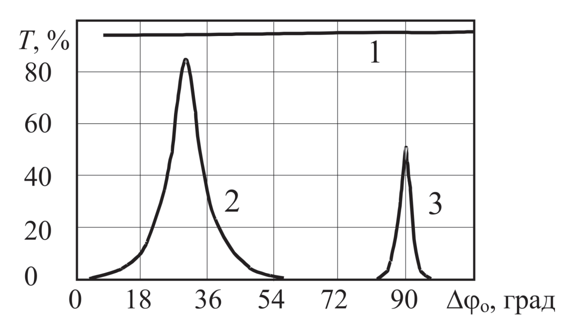


Рис. 2. *Зависимость прошедшего потока от начальной разности фаз. 1) $\Delta\nu$=50 МГц, α=0,01 м$^{-1}$, l=10 м, L=100 м; 2) $\Delta\nu$=0,25 МГц, α=1 м$^{-1}$, l=10 м, L=500 м; 3) $\Delta\nu$=75 кГц, α=1 м$^{-1}$, l=40 м, L=2990 м*

Расчет прохождения модулированного излучения через поглощающие слои

Для оценки доли передаваемой энергии лазерного излучения по реальным атмосферным трассам и определения оптимальных параметров модулированного с помощью интерференционного явления пучка нами были проведены расчеты коэффициентов пропускания энергии при прохождении длинных трасс при различных положениях локального участка с повышенным ослаблением относительно источника излучения и фотоприемника.

Для распределения интенсивности по направлению распространения двух пучков, испытывающих биения, использовали выражение

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз интерферирующих лучей, I_1 и I_2 – их интенсивности, γ – степень когерентности.

Расчет потерь проводили в направлении распространения пучков, в пределах ослабляющего слоя. Ослабляющий слой разделяли на элементарные участки, на которых потери интенсивности суммарного пучка определяли из закона Бугера. Интенсивность суммарного пучка на входе в i+1 участок определяли с учетом фаз интерферирующих пучков на этом участке и их потерями на i-ом участке, начиная с первого.

Выводы, следующие из этих расчетов, могут быть распространены и для случая прохождения импульса лазерного излучения через локальный участок световода, имеющей повышенный коэффициент ослабления, например, стык двух световодов или трещину.

На рис. 2–5 приведены расчетные зависимости коэффициента пропускания участка трассы с повышенным ослаблением потока модулированного лазерного излучения. Приняты следующие обозначения: $\Delta\nu$ – частота модуляции оптического излучения, МГц, α – коэффициент ослабления, м$^{-1}$, l – длина поглощающего участка трассы, м, $\Delta\varphi_0$ – сдвиг фаз взаимодействующих волн в начальной точке, град, L – расстояние от излучателя до ослабляющей области, м.

Зависимость мощности прошедшего (через ослабляющий участок при малой его оптической плотности и малом расстоянии до него) потока практически не зависят от частоты модуляции излучения, что показывает кривая 1 на рис. 2. При увеличении оптической плотности локального участка или расстояния до него за счет подбора начальной разности фаз можно увеличить величину прошедшего потока излучения для разных значений частоты модуляции. Это подтверждается кривыми 2, 3 на рис. 2.

При оптимизации частоты модуляции потока лазерного излучения, для различных расстояний до ослабляющего участка, энергия прошедшего потока зависит от оптической плотности неоднородного слоя. Рис. 3 показывает, что вид зависимости мощности прошедшего потока от толщины ослабляющего слоя в значительной мере зависит от расстояния до него.

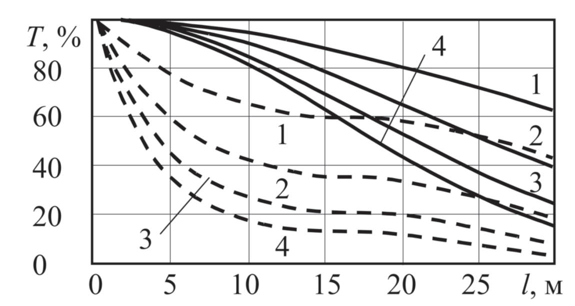


Рис. 3. *Зависимость прошедшего потока от длины поглощающего участка при оптимальной частоте модуляции ($\Delta\varphi_0$=90). - - - – L= 400 м, ——— – L= 1500 м. Коэффициент ослабления α, м$^{-1}$: 1) 1, 2) 2, 3) 3, 4) 4*

Через пространственно ограниченный участок оптической трассы (длиной менее 10 м), даже при высоком коэффициенте ослабления, можно передавать поток оптического излучения с высокой эффективностью (рис. 4). При этом, в зависимости от расстояния до ослабляющего участка и его протяженности, существует оптимальная частота модуляции, обеспечивающая наибольший коэффициент прохождения потока излучения. Из расчетов следует, что при увеличении оптической плотности (за счет увеличения протяженности слоя) даже при

оптимальной частоте модуляции коэффициент пропускания слоя может уменьшиться до нуля (наблюдается полное ослабление потока оптического излучения).

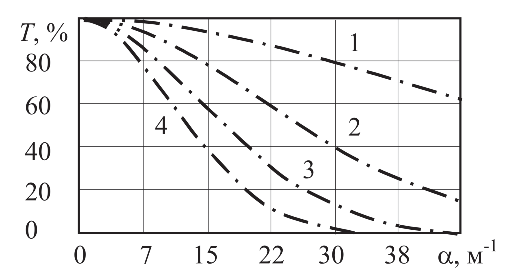


Рис. 4. *Зависимость прошедшего потока от коэффициента поглощения при частоте модуляции 30 кГц ($\Delta\varphi_0$=90, L=1500 м). Длина поглощающего участка l, м: 1) 1, 2) 2, 3) 3, 4) 4*

С увеличением частоты модуляции, при любых параметрах поглощающего участка и расстояния до него, уменьшается зависимость потока прошедшего излучения от частоты и усиливается зависимость от оптической плотности. При этом коэффициент пропускания имеют тенденцию к снижению, что подтверждает рис. 5. Оптимальная частота модуляции излучения, обеспечивающая максимальное пропускание, наблюдается для малых значений частоты модуляции. При этом небольшое изменение частоты модуляции приводит к значительному изменению коэффициента пропускания, зависящего от частоты по гармоническому закону. При любых параметрах модулированного потока и неоднородной трассы суммарные потери на поглощающем участке пропорциональны его оптической плотности.

Результаты расчетов справедливы для заданного момента времени.

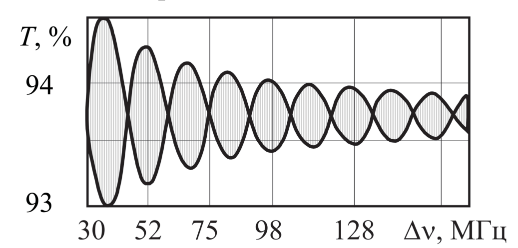


Рис. 5. *Зависимость коэффициента пропускания от частоты модуляции. α=0,01 м$^{-1}$, l=10 м, L=100 м*

Заключение

Расчеты, результаты которых приведены выше (рис. 2–5), подтверждают возможность передачи потока лазерного излучения с минимальными потерями через локальные участки трассы, имеющие повышенный коэффициент ослабления. При этом ослабление модулированного пучка может быть значительно меньше значения, определяемого из закона Бугера для зондирующего излучения постоянной мощности. Поэтому до анализируемого объема будет доходить значительная доля из исходного потока энергии, а отсутствие ослабления на трассе между излучателем и счетным объемом позволяет получать высокое соотношение сигнал-шум.

Дальнейшие исследования в данном направлении связаны с оптимизацией параметров устройства для формирования заданных пространственно-временных параметров коллимированного потока лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухаркин Е.С. Электрофизика информационных систем: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 671 с.
2. Мышкин В.Ф. Особенности рассеяния лазерного излучения из области интерференции // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 3. – С. 64–68.